Методы экранирования помех на печатной плате:
правила выполнения и ограничения

Антон ЕРЕМИН
ant@s-erp.ru

Печатная плата с активными электронными компонентами — это не только главный источник помех в системе, но и конечный приемник внешних помех. Экранирование является наиболее понятным приемом борьбы с помехами для любого разработчика. В статье рассматриваются виды и правила устройства экранов на печатных платах, возможности экспертных систем как инструмента поддержки принятия решений.

Введение

Опыт компании «СЕРП», накопленный при создании и внедрении систем комплексной автоматизации, показывает, что разработчики электронного оборудования часто демонстрируют реактивный подход к обеспечению электромагнитной совместимости, что приводит к повышенному расходу ресурсов на доработку после получения отрицательных результатов испытаний. В ряде случаев дополнительные затраты времени на доработку становятся причиной срыва сроков комплексных проектов, что влечет за собой значительные материальные и репутационные потери для головного исполнителя. Поэтому проактивный подход к обеспечению электромагнитной совместимости должен пронизывать весь процесс разработки электронного оборудования, начиная с фазы эскизного проектирования.

При сравнении стоимости мероприятий по обеспечению ЭМС, проводимых на поздних этапах проектирования прибора в целом, можно обнаружить, что их стоимость при сравнимой эффективности в 10–100 раз больше стоимости мероприятий, выполненных при разработке печатной платы. Существует и так называемая пирамида обеспечения ЭМС [1], которая визуализирует эффективность усилий, затраченных разработчиком на те или иные мероприятия по обеспечению ЭМС (рис. 1). При ее рассмотрении мы можем убедиться, что затраты на обеспечение ЭМС на этапе разработки печатных плат невелики, но влияние принятых мер на характеристики конечного изделия значительно.

Рис. 1. Пирамида обеспечения ЭМС

В настоящее время разработчики все чаще выбирают компоновку с одной печатной платой или комбинацией гибких и жестких печатных плат. При снижении количества печатных плат в устройстве можно обеспечить повышение:

- технологичности изделия при сборке и настройке;
- характеристик ЭМС за счет исключения протяженных межплатных связей, которые являются эффективными приемниками и излучателями помех;
- надежности изделий за счет исключения одного из слабых мест в аппаратуре — межплатных проводных связей [2].

Для техники с повышенными требованиями к надежности (военной или космической) последние два преимущества наиболее актуальны.

Для схем, в которых обработка низковольтных измерительных сигналов совмещена с высокоскоростной цифровой обработкой, использование компоновки с одной платой часто требует специальных мер: зонирования, локального экранирования и применения специальных структур печатных плат. Также большое значение в этом случае имеет обеспечение низкоимпедансного заземления и развязка по питанию. Однако в статье мы рассмотрим лишь один из инструментов разработчика печатных плат — экранирование.

Механизмы экранирования

Экранирование электромагнитных взаимодействий обычно связывают с токопроводящими структурами (сплошными или периодическими), которые поглощают или отражают энергию помехи. Как известно, электромагнитный экран является обратимым, то есть одновременно снижает мощность проникающих в экранированный объем помех и сокращает эмиссию помех во внешнюю среду. В связи с этим в статье используется термин «изоляция» как синоним термина «экранирование».

С точки зрения необходимости снижения уровня перекрестных наводок и эмиссии помех экранирующие элементы печатной платы, по крайней мере до гигагерцевого диапазона, находятся в ближней зоне электрического и магнитного полей. Электрическое поле в ближней зоне может быть ослаблено при помощи отражающих или отклоняющих экранов, в качестве которых могут выступать печатные проводники. На магнитное поле в ближней зоне эффективно действует только заградительный «электрически толстый» поглощающий экран. Поэтому в случае печатной платы магнитное поле помехи в первую очередь должно быть снижено за счет уменьшения площади токовых контуров сигналов, то есть расположения сигнальных проводников как можно ближе к проводнику, несущему обратный ток.

Как и для любого электромагнитного экрана, эти элементы следует должным образом заземлить (связать со слоем печатной платы, несущим условно нулевой потенциал). Теоретически экранирующие элементы на печатной плате, имеющие емкостную связь с поверхностью питания (слоем, несущим потенциал питания), могут также служить экранирующим элементом, поскольку при повышении частоты обе эти поверхности оказываются шунтированы конденсаторами развязки по питанию. Однако при прочих равных условиях импеданс для протекания шумовых токов через поверхность заземления заметно ниже. Здесь мы коснемся вопросов соединения экранирующих элементов самой печатной платы с системой заземления, хотя схема и конструктивное исполнение системы заземления прибора имеют в данном случае решающее значение, так как могут оказаться «слабым звеном» на пути шумовых токов и значительно снизить эффективность даже правильно выполненных экранов.

Экранирование поверхностями

Эффективный метод экранирования сигналов на многослойной печатной плате — расположение их между заземляющими поверхностями (или поверхностями для обратных токов). Этот способ рекомендуют как для сигналов — источников помех с частотой более 100 МГц, так и для чувствительных к помехам сигналов. Печатные проводники, расположенные между поверхностями печатной платы (полосковые линии) по сравнению с проводниками, находящимися во внешних сигнальных слоях (микрополосковые линии) очевидным образом изолированы от внешней среды. Перекрестные наводки между проводниками печатной платы можно снизить, обеспечив более плотное прилегание сигнальных проводников к поверхности заземления (рис. 2). Этот эффект объясняется меньшей шириной растекания обратных токов по смежным поверхностям [3], поскольку 90% обратного тока течет в пределах 5 В в обе стороны от центра сигнального проводника (здесь: В — высота проводника над поверхностью заземления). Другой эффективный способ снижения перекрестных наводок — ортогональная прокладка проводников в соседних сигнальных слоях печатной платы.

Для снижения излучения помех с краев печатной платы все незаземленные проводники внутри печатной платы должны располагаться не ближе 20В от края печатной платы (где В — расстояние между слоями в печатной плате, рис. 3). По краям платы должны располагаться проводники заземления, которые таким способом формируют эффективный экран для сигналов печатной платы [4]. Однако существуют публикации, критикующее ставшее традиционным «правило 20В».

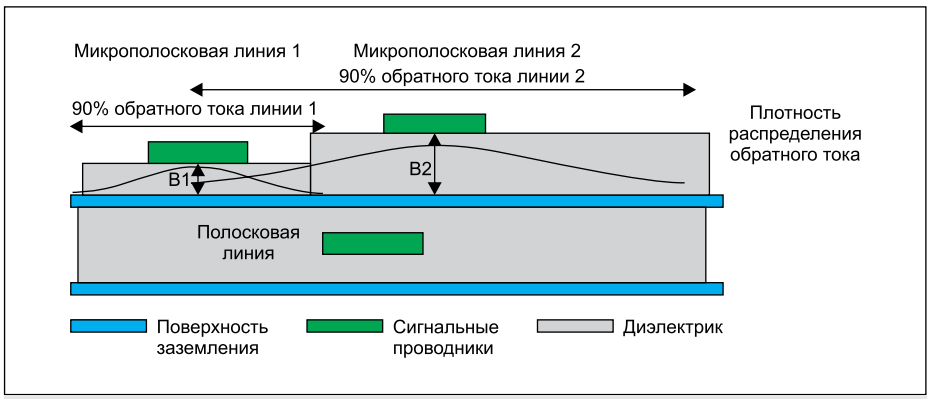

Рис. 2. Конфигурации сигнальных проводников печатной платы

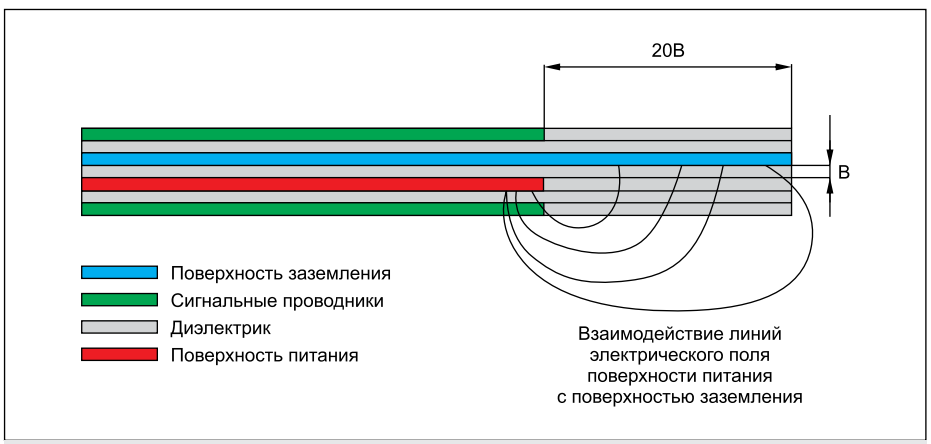

Рис. 3. «Правило 20В»

Например, авторы исследования [5] отмечают пренебрежимо малый положительный эффект от использования данного правила на многослойных печатных платах и значительный отрицательный эффект (усиление уровня излучаемых помех) — на двухсторонних печатных платах. Поэтому использовать «правило 20В» на двухсторонних печатных платах не следует.

Защитный контур и шунтирующий проводник

Отклоняющее экранирование электрического поля выполняют, располагая заземленные медные проводники вокруг экранируемых цепей. Они образуют так называемый защитный контур (guard trace), обеспечивающий изоляцию печатной платы в целом, ее сегмента или точки ввода/вывода сигналов. Этот контур должен быть соединен с системой заземления и не должен нести обратных токов. Если на печатной плате предусмотрено экранирующе-защитное заземление, то защитный контур должен быть соединен с этим заземлением.

Строго говоря, такой способ не формирует экранированного объема, но позволяет отклонить и замкнуть линии электрического поля источника помехи. Для отклонения магнитного поля аналогичным образом необходимо использовать материал с высокой магнитной проницаемостью (например, пермаллой), что не реализуемо на печатной плате.

Поэтому основные правила защитного контура таковы:

- его эффективность повышается с повышением импеданса в канале передачи сигнала;
- эффективность защитного контура для снижения перекрестных наводок невелика (по сравнению с эквивалентным разнесением на плате), но эффективность экранирования сигнального проводника от внешней среды достаточно высока.

Для высокочастотных цепей защитный контур соединяют с поверхностью заземления с использованием набора переходных отверстий [6]. На квадрате, сторона которого равна длине волны помехи, таких отверстий должно быть несколько (насколько это позволяет плотность расположения сигнальных линий).

Для изоляции магнитного поля помехи чувствительные аналоговые сигналы и шумящие высокоскоростные линии должны быть проложены в слое, смежном с заземляющей поверхностью. Если поверхность заземления на плате отсутствует, эти линии должны быть проложены вплотную к проводникам системы заземления (на однослойной плате) или под/над ними (для двусторонних плат). Этот параллельный проводник называется шунтирующим. В идеальном случае

ширина шунтирующего проводника должна быть в три раза больше ширины сигнальной линии для того, чтобы «собрать» все поле, образованное сигнальным проводником. Заметим, что шунтирующий проводник не обязательно должен быть соединен с системой заземления на печатной плате, так как несет обратный ток именно шунтируемого сигнала.

Оба приема экранирования (защитный контур и шунтирующий проводник) могут быть использованы по отдельности или вместе. Емкостное взаимодействие сигнального проводника в этом случае будет минимизировано с помощью защитного контура, а индуктивное взаимодействие — с помощью шунтирующего проводника. Для микрополосковых и полосковых линий применение защитного контура или шунтирующего проводника имеет смысл в тех случаях, когда вокруг сигнального проводника отсутствует проводник (скажем, поверхность заземления или питания), которые находятся ближе, чем экранирующий проводник [7]. Например, для микрополосковой линии, расположенной на расстоянии 0,2 мм над поверхностью заземления, устройство защитного контура на расстоянии 0,3 мм от края линии бессмысленно. Таким образом, на многослойных печатных платах эти приемы экранирования малоэффективны в случае цифровых сигналов, но вполне допустимы для защиты аналоговых сигналов.

Возьмем пример печатной платы, в которой проводники шириной 0,25 мм расположены на том же расстоянии от поверхности заземления (h = 0,25 мм) и на расстоянии d = 1 мм (между краями) по горизонтали. В этом случае верхняя оценка уровня перекрестных наводок может быть определена по формуле:

$$XT = \frac{1}{1+\left(\frac{d}{h}\right)^2} \approx 6\%(-25\ \text{дБ}).$$

Запас по помехозащищенности для цифровых сигналов обычно больше этого значения, и сигналы не будут искажены. Но такой уровень перекрестных наводок может вызвать повышение уровня кондуктивных высокочастотных синфазных помех в межплатных или межблочных кабелях и, как следствие, повышенный уровень эмиссии помех. Для чувствительных аналоговых сигналов измерительных цепей такой уровень перекрестных наводок тоже может оказаться неприемлемым. В таком случае пара защитных проводников может снизить уровень перекрестных наводок на несколько порядков.

Однако на двухсторонних печатных платах, на которых сигнальный и обратный проводники проложены с разных сторон платы на расстоянии 1,6 мм, защитный контур, расположенный как можно плотнее к сигнальному проводнику, эффективно экранирует его. В соответствии с формулой распределения обратных токов ширина шунтирующего проводника должна быть не менее 3В и 3Ш одновременно, где В и Ш — высота сигнального проводника над поверхностью шунтирующего проводника и ширина сигнального проводника соответственно (рис. 4).

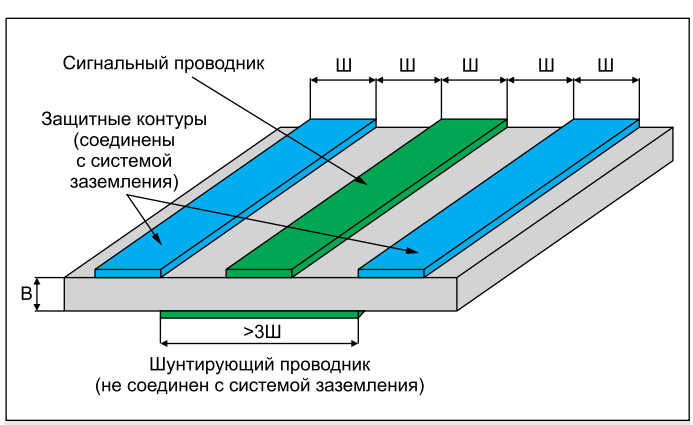

Рис. 4. Расположение защитного контура и шунтирующего проводника относительно сигнальной линии

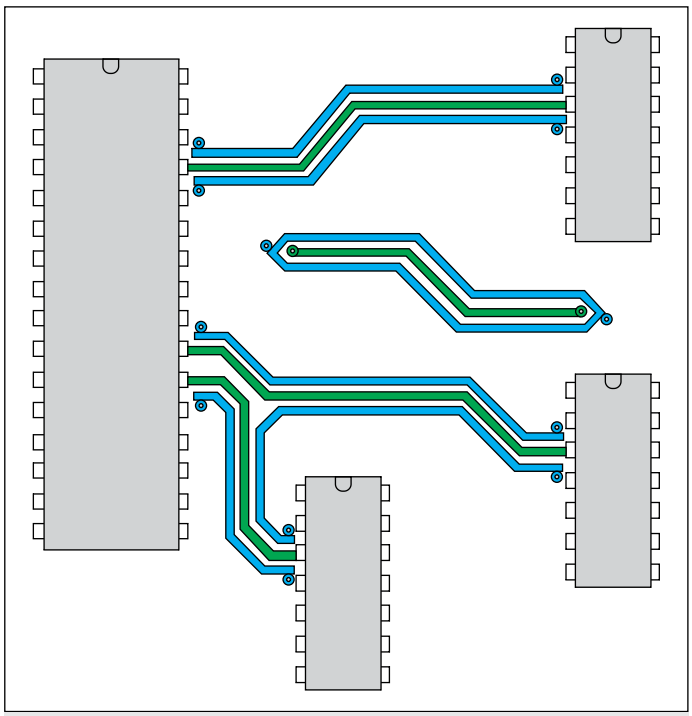

Рис. 5. Пример правильной раскладки защитных контуров

Использование одной пары защитных проводников для нескольких сигналов недопустимо. Два сигнала могут использовать пару защитных проводников только на короткой дистанции совместной прокладки (рис. 5).

Как любые другие экраны, защитные проводники и шунтирующие проводники должны быть качественно заземлены. Незаземленные защитные проводники как эффективно поглощают энергию помех, так и излучают ее на соседние проводники. Защитные проводники должны быть соединены с системой заземления как минимум в начале и конце защищаемого проводника. В идеале они должны быть соединены переходными отверстиями с поверхностью заземления (в случае многослойной печатной платы). Если защищаемый проводник «электрически длинный», то должно быть предусмотрено заземление защитного проводника по всей длине с определенным интервалом. Интервал заземления должен быть возможно ниже, но на длине, равной «геометрической длине фронта сигнала» (расстояние, проходимое электромагнитной волной за время, равное времени фронта импульса), таких соединений должно быть не менее трех. В этом случае необходимо избегать равных расстояний между точками соединения с системой заземления, чтобы снизить добротность возможного резонанса на длине проводника (рис. 6).

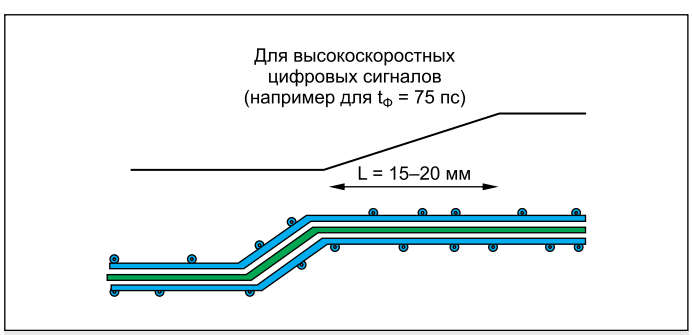

Рис. 6. Определение количества точек соединения защитного контура с системой заземления в зависимости от времени фронта цифрового сигнала

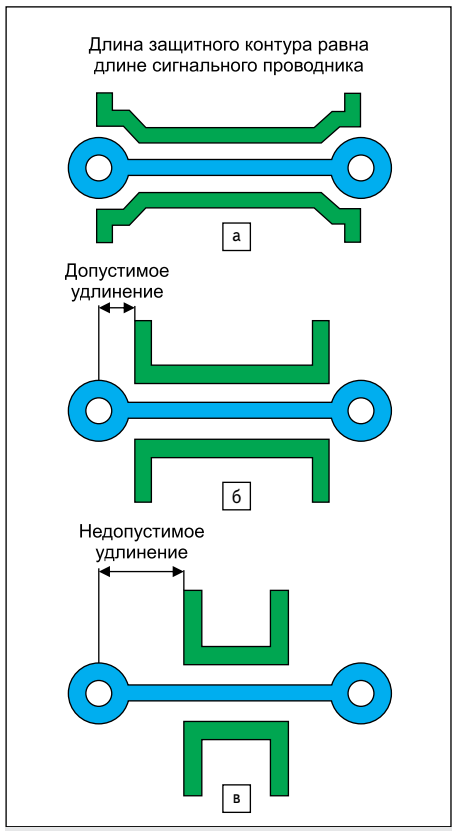

Рис. 7. Определение допустимой длины защитного контура:
а) идеальный случай; б) приемлемо; в) неприемлемо

Эрик Богатин (Eric Bogatin) в [8] приводит результаты моделирования взаимодействия защитного контура с полем источника помехи как для микрополосковой, так и полосковой линии. Объектом моделирования являлись три конфигурации:

- проводник — источник помехи и проводник — приемник помехи проложены параллельно на расстоянии, равном ширине проводника;
- источник помехи и приемник помехи разнесены на расстояние, равное утроенной ширине проводника;
- между источником и приемником помехи помещен защитный контур (расстояние защитный контур — проводник равно ширине проводника).

По результатам моделирования им сделан ряд значимых выводов.

- В случаях, когда уровень перекрестных наводок в –50 дБ (особенно для цифровых сигналов) достаточен, защитный контур не обеспечивает преимуществ по сравнению с простым разнесением на аналогичное расстояние.
- Для микрополосковой линии уровень взаимодействия линии источника помехи и линии приемника помехи может даже усилиться по сравнению с разнесением линий на соответствующее расстояние. Защитный контур при этом незначительно усиливает емкостное взаимодействие и также незначительно ослабляет индуктивное взаимодействие. Конечный результат зависит от импеданса линии, то есть низкоимпедансная цепь может получить незначительное ослабление перекрестных наводок в присутствии защитного контура. Снижение импеданса заземления защитного контура в этом случае не приносит результата. В целом использование защитного контура в конфигурации микрополосковой линии нецелесообразно.
- В конфигурации полосковой линии защитный контур позволяет снизить перекрестные наводки на ближнем конце до –70 дБ (против –50 дБ при разнесении на соответствующее расстояние). Защитный контур в этом случае снижает емкостное взаимодействие более чем в 10 раз, повышая индуктивное взаимодействие в 2 раза. Перекрестные наводки на дальнем конце могут быть устранены. Защитный контур должен быть заземлен с обоих концов с минимальной паразитной индуктивностью. Длина защитного контура должна соответствовать длине защищаемого проводника, поскольку любое удлинение защитного контура повышает импеданс для шумовых токов. Допустимым считается случай, когда удлинение защитного контура относительно защищаемых проводников необходимо для обеспечения минимального зазора между печатными проводниками (рис. 7).

Экранирование с использованием «решетки из переходных отверстий»

Этот способ обычно применяют для экранирования полосковых линий, используемых для передачи высокоскоростных сигналов, в пределах одного сигнального слоя [9, 10]. Аналогично методам экранирования микрополосковых линий, этот метод пригоден в тех случаях, когда разнесение проводников на расстояние, обеспечивающее требуемое снижение уровня перекрестных помех, невозможно из-за ограничений по габаритам.

Использование рядов металлизированных переходных отверстий, расположенных вдоль полосковой линии, обеспечивает изоляцию соседних по сигнальному слою проводников. По существу, эта структура имеет вид решетки, так как переходные отверстия объединены сверху и снизу поверхностями заземления. Наличие копланарных защитных проводников, расположенных в сигнальном слое, дополнительно повышает эффективность такой решетки (рис. 8). Экспериментально доказано, что решетка переходных отверстий без защитных проводников снижает перекрестные наводки на ближнем конце, но увеличивает перекрестные наводки на дальнем конце. При этом решетка с защитными проводниками снижает оба параметра. Уменьшение расстояния между переходными отверстиями позволяет повысить эффективность экранирования, но при этом нужно следить, чтобы сквозные переходные отверстия не образовали разрыв для обратных токов в поверхности заземления или питания. В этом случае предпочтительно использование технологии слепых, или внутренних переходных отверстий. Близкое расположение решетки к защищаемой полосковой линии может также снизить

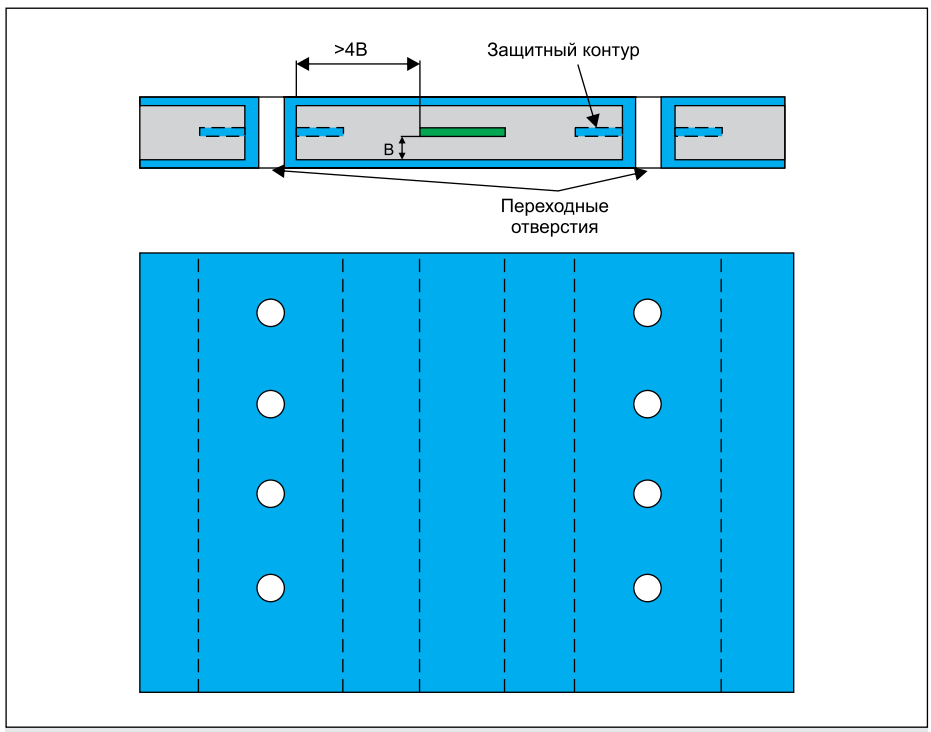

Рис. 8. Структура решетки из переходных отверстий с защитным контуром

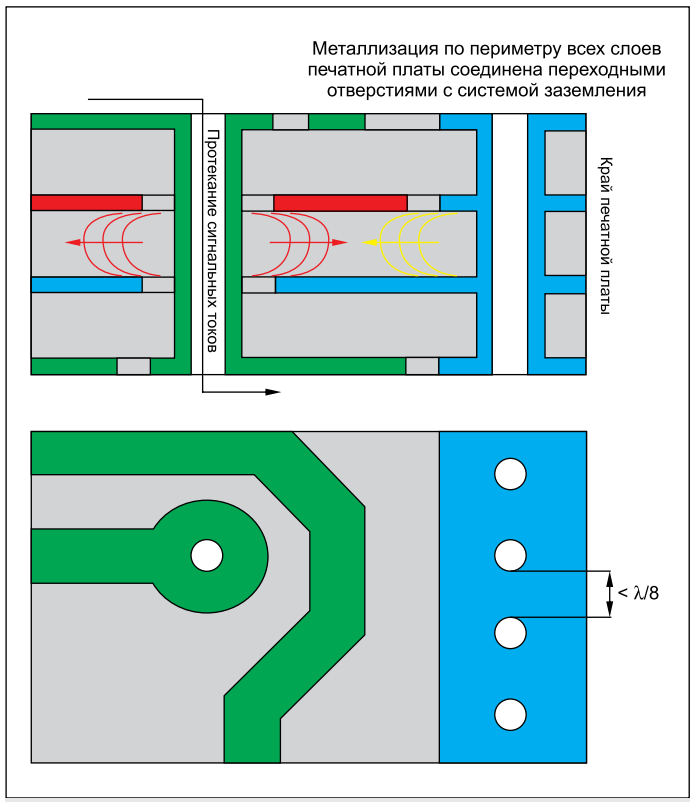

Рис. 9. Возникновение помех между слоями печатной платы и их взаимодействие с решеткой из переходных отверстий

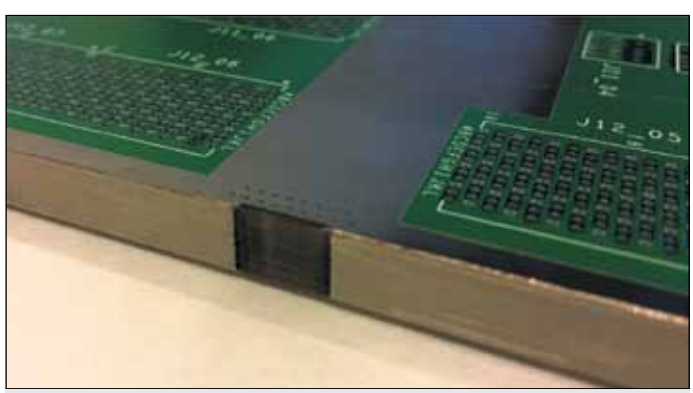

Рис. 10. Металлизация торца толстой печатной платы (не металлизированный участок защищен двойной решеткой из переходных отверстий)

уровень ее изоляции. Поэтому расстояние от края полосковой линии до края переходного отверстия должно быть как минимум в 4 раза больше расстояния от полосковой линии до поверхности заземления.

Другое распространенное использование решетки из переходных отверстий — экранирование помех, излучаемых с торцов печатной платы. При протекании высокочастотных токов между слоями переходные отверстия действуют как излучатели электромагнитных помех, радиально распространяющихся между слоями печатной платы (рис. 9). Расположенные близко к краю печатные проводники высокочастотных сигналов и шум на поверхностях питания или заземления также могут стать источником помех. При этом края поверхностей заземления могут действовать как щелевая антенна, эффективно излучая эту энергию в окружающее пространство. Решетка из переходных отверстий соединяет плечи щелевой антенны и образует клетку Фарадея, снижая уровень излучаемых помех за счет их отражения обратно в объем диэлектрика печатной платы. Рекомендуемое расстояние между отверстиями должно быть меньше λ/8. Очевидно, что длина волны в диэлектрике должна быть определена с учетом диэлектрической проницаемости материала. Таким образом, снижение расстояния между отверстиями до 1,3 мм обеспечивает экранирование помех в частотном диапазоне до 15 ГГц. С повышением частоты экранирование с использованием переходных отверстий теряет эффективность [11]. Например, сигнал передачи данных на скорости 28 Гбит/с имеет пятую гармонику на частоте 70 ГГц, что требует сокращения расстояния между переходными отверстиями до 0,3 мм, что обычно невозможно технологически. В этом случае вместо решетки из переходных отверстий должна быть использована сплошная металлизация торца печатной платы (рис. 10).

Защитное кольцо

В отличие от цифровых низкоимпедансных цепей аналоговые цепи часто являются высокоимпедансными и поэтому особо чувствительными к воздействию электрического поля. Кроме того, запас по помехозащищенности у аналоговых сигналов существенно ниже, чем у цифровых. В качестве одной из мер защиты аналоговых сигналов на печатной плате часто используют защитное кольцо, которое «перехватывает» электрическое поле помехи и отводит шумовые токи в систему заземления (возможно даже через резистор). Обычно защитное кольцо выполняют для снижения токов утечки высокоимпедансных сигналов, поэтому его применение позволяет получить два эффекта одновременно. На рис. 11 приведены примеры использования защитного кольца для изоляции входа операционного усилителя при его включении по схеме неинвертирующего и инвертирующего усилителя.

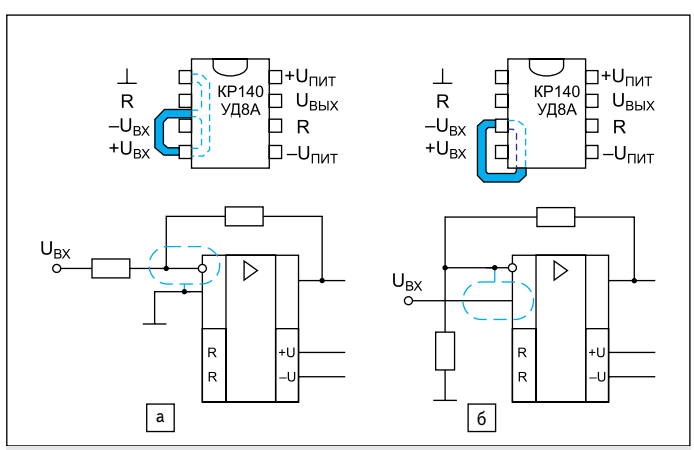

Рис. 11. Топология защитного кольца для инвертирующей и неинвертирующей схем включения операционного усилителя:
а) инвертирующий усилитель; б) неинвертирующий усилитель

Заземляющие островки

Все высокоскоростные микросхемы должны иметь в слое их монтажа заземленную площадку (островок) металлизации под корпусом. Эта площадка является «миниатюрной поверхностью заземления» [12]. По возможности переходные отверстия, соединяющие площадку с поверхностью заземления, должны быть расположены напротив выводов заземления (рис. 12). Большее количество переходных отверстий, соединяющих сигнальный слой с поверхностью заземления, обеспечивают снижение импеданса в системе заземления при повышении частоты. Распределение таких отверстий по всей площади «островка» или «по периметру» поможет снизить влияние их взаимной индуктивности на общую индуктивность соединения (соединение группой вплотную расположенных переходных отверстий требует учета взаимной индуктивности). Такой прием особенно эффективен в тех случаях, когда между высокоскоростным компонентом (например, генератором тактовых импульсов) и поверхностью

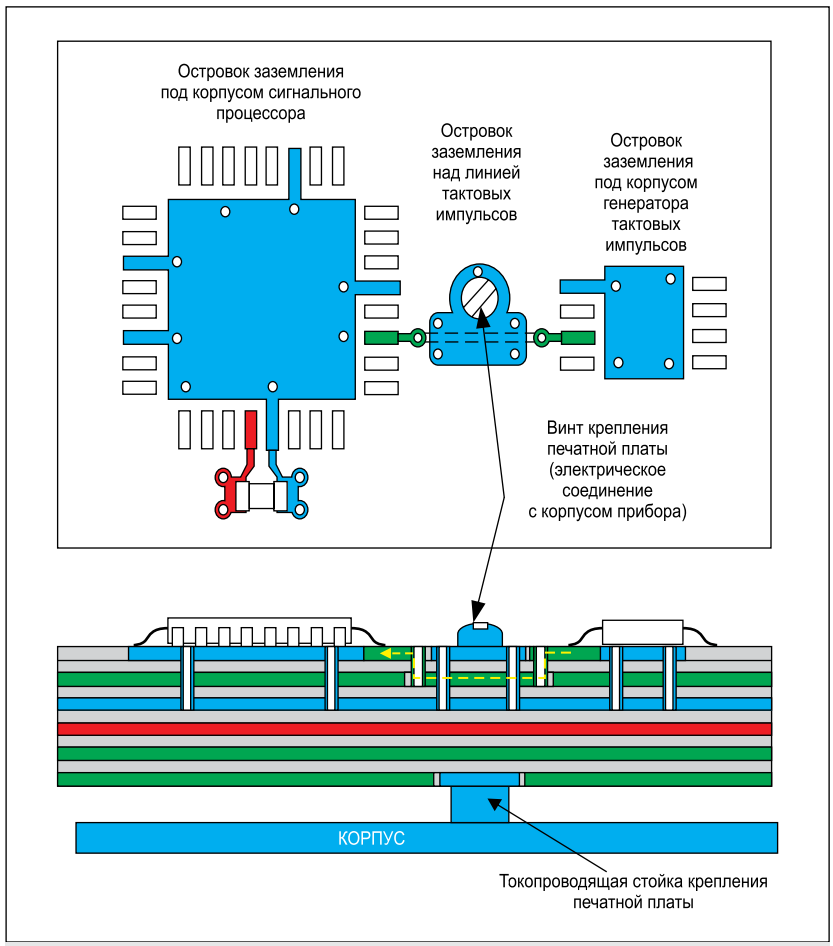

Рис. 12. Пример организации островков заземления

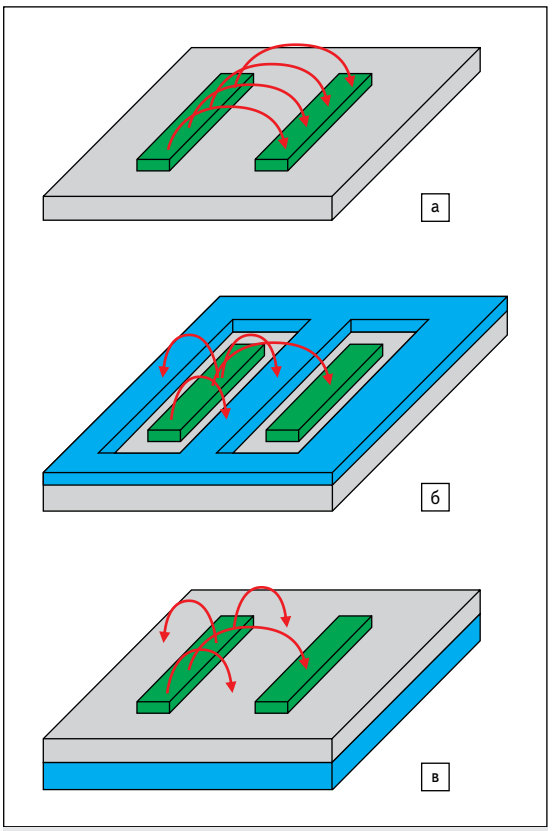

Рис. 13. Взаимодействие линий электрического поля с заземленными участками металлизации и поверхность заземления:
а) без заполнения металлизацией и поверхности заземления;
б) с заполнением металлизацией, но без поверхности заземления;
в) без заполнения металлизацией, но с поверхностью заземления

заземления на многослойной печатной плате располагается еще один сигнальный слой. В этом случае предпочтительнее использовать еще один заземленный островок, защитив и линию тактовых импульсов. Дополнительно повысить эффективность островка в данном случае можно, обеспечив соединение островка с корпусом прибора через опорную стойку печатной платы. Недостаток такой технологии состоит в том, что островок обычно не покрывает всего пути тактового сигнала, что снижает эффективность изоляции его шумов.

Металлизация свободных областей

В завершение можно упомянуть, что на печатных платах все свободное от сигнальных проводников пространство должно быть занято заземленными проводниками, которые выполняют роль как отклоняющего (для электрического поля) экрана, так и заградительного (для проводников под заземленными проводниками) экрана.

Для производителей многослойных печатных плат автоматическое заполнение металлизацией всего свободного пространства в сигнальных слоях помогает поддерживать симметрию структуры печатной платы.

Преимущество металлизации свободного пространства для двухслойных печатных плат особенно велико. Механизм отклонения линий электрического поля проводниками металлизации показан на рис. 13. Линии электрического поля находят наиболее короткий путь, замыкаясь на ближайший заземленный проводник.

На многослойных печатных платах влияние металлизации свободного пространства на перекрестные наводки ничтожно, поскольку поверхность заземления обычно находится гораздо ближе к проводнику — источнику помехи, чем металлизация.

Проводники металлизации аналогично защитному контуру повышают изоляцию по электрическому полю помехи, поэтому в аналоговых высокоимпедансных схемах ее эффективность больше, чем в цифровых.

Недостатки и ограничения структур экранирования

- Широкий заземляющий островок или металлизация заземления могут исказить конфигурацию полосковой линии, приводя к локальному скачку волнового сопротивления в окрестности островка (рис. 14). Результатом этой неравномерности могут стать повышенный уровень отражений в линии, звон на фронте и срезе сигнала. Аналогично действует решетка из переходных отверстий при ее локальном использовании.
- Широкий заземляющий островок или металлизация могут нарушить конфигурацию полей в окрестности симметричной дифференциальной линии (например, линии LVDS). Это обычно нарушает симметрию такой линии и приводит к искажению передаваемого сигнала. Использование защитных проводников с одной стороны от таких линий недопустимо по той же причине. Защитные проводники должны быть расположены с обеих сторон от дифференциальной линии. Кроме того, для снижения уровня ретранслируемых защитным проводником помех расстояние «сигнальный проводник — защитный проводник» должно быть в 2 раза больше расстояния между сигнальными проводниками в паре.
- Заземляющий островок, защитный проводник или поверхность металлизации подвержены резонансу, то есть способны повышать уровень помех до 12 дБ [6] по сравнению со случаем, когда эти защитные меры не использованы. Неподключенная область металлизации на печатной плате может стать также антенной для помех, поэтому ее необходимо соединить с системой заземления. Области металлизации с отношением длина/ширина более 10 должны быть со-

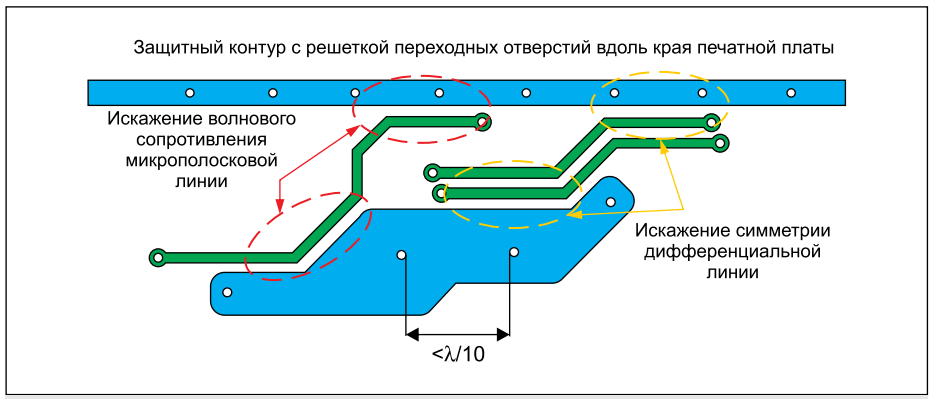

Рис. 14. Недопустимое использование элементов экранирования совместно с линиями передачи высокоскоростных сигналов

единены с поверхностью заземления переходными отверстиями с противоположных краев. При наличии СВЧ-помех переходные отверстия должны располагаться с шагом не более λ/10 (с учетом снижения скорости распространения электромагнитной волны в диэлектрике печатной платы).

- На многослойных печатных платах использование металлизации свободного пространства печатной платы может служить эффективным теплоотводом при автоматической пайке, что снижает качество пайки. С другой стороны, металлизацию часто используют для отвода излишков тепла, выделяемого компонентами, что помогает избежать использования дополнительного радиатора. Кроме того, соединение металлизации с поверхностью заземления сквозными переходными отверстиями повышает плотность перфорации других поверхностей питания и заземления. Для предотвращения данного явления необходимо использовать слепые переходные отверстия.
- Экранирование с помощью ряда переходных отверстий (особенно двойного ряда) по краю печатной платы часто делает невозможным использование миниатюрных интерфейсных соединителей из-за необходимости их переноса на несколько миллиметров к центру.

Инструменты разработчика

Выбор эффективных конструкторских решений по обеспечению ЭМС для каждого конкретного случая — непростая задача. Еще сложнее выбрать те мероприятия, которые будут оптимальными с точки зрения не только электромагнитной совместимости, но и комплекса функциональных и массогабаритных параметров, стойкости к внешним воздействиям.

Для решения этих задач в минимальные сроки можно воспользоваться консультационными услугами специалистов, включая мониторинг электромагнитной обстановки на изделии и экспертизу изделия или проекта с точки зрения ЭМС на стадии разработки конструкторской документации.

Для системной работы по обеспечению электромагнитной совместимости разрабатываемых изделий понадобится коллектив с глубокими знаниями в этой области. К примеру, ООО «СЕРП» разработало курс «Электромагнитная совместимость каналов передачи электрических сигналов», который сочетает практический опыт сотрудников, полученный при наладке электронных систем, с последними исследованиями в области ЭМС.

Однако даже наличие коллектива высококвалифицированных специалистов сегодня не гарантирует успешной работы в будущем. Специалисты — носители квалификации, имеющие бесценный опыт успешных решений и ошибок, могут перейти на другие предприятия, снижая потенциал подготовленного коллектива. Поэтому систематизация накопления и распространения знаний на предприятии — важная стратегическая задача. Одним из автоматизированных инструментов работы с этими знаниями являются экспертные системы. Разработанная в ООО «СЕРП» экспертная система «S-EMC-экспертиза» предназначена для формирования базы знаний по вопросам электромагнитной совместимости с возможностью доступа к ней как в ручном режиме (режиме «советчика»), так и в автоматическом режиме (режиме «автоматизированной оценки технических решений»).

Экспертная система, разрабатываемая группой компаний «СЕРП» и интегрируемая в единое информационного пространство организации, предназначена для информационной поддержки принятия технических решений инженера-конструктора при обеспечении электромагнитной совместимости на всех этапах разработки.

Основные задачи, решаемые экспертной системой:

- оценка текущего состояния конструкции;
- разработка рекомендаций по переводу конструкции изделия в «идеальное состояние», соответствующее техническим требованиям;
- прогнозирование последствий отдельных мероприятий по переводу конструкции в «идеальное состояние» или произвольного их набора.

Для выполнения этих задач ПО «S-EMC-экспертиза» обеспечивает:

- централизацию баз данных и знаний (правил) в пределах единого информационного пространства предприятия Пользователя и программно-определяемые алгоритмы обработки и принятия решения на рабочем месте инженера-конструктора;
- неограниченную по времени возможность возврата к прежнему содержанию правила для защиты базы знаний от намеренного повреждения;
- поддержку итеративного процесса проектирования, допускает возврат на ранние стадии проектирования для внесения необходимых изменений;
- выдачу рекомендаций по выбору оптимального варианта в соответствии с введенными целевыми параметрами;
- обучение системы путем формирования новых «правил» на основе цикла «рекомендации-реализация-верификация результата» и ввода данных верификации инженером-конструктором.

Автоматический режим работы экспертной системы включает анализ взаимодействий элементов «матрицы электромагнитной совместимости» системы и вывод перечня возможных мероприятий для каждого факта «несовместимости». Далее пользователь может выбрать автоматически рекомендованный набор мероприятий из перечня или изучить альтернативные возможности, комбинируя мероприятия из предоставленного ему перечня. Последний режим предназначен для работы на начальном этапе эксплуатации системы и позволяет проводить ее «обучение» в полуавтоматическом режиме.

«Матрица электромагнитной совместимости» на уровне электронной системы должна быть сформирована на стадии эскизного проектирования. Эта матрица предназначена для анализа совместимости входящих в систему электронных блоков, соединяющих их кабелей и экранирующих конструкций, обеспечивающих деление системы на «электромагнитные зоны» (например, монтажных шкафов). Анализ на данном уровне представляет собой наиболее сложную задачу и на начальном этапе эксплуатации экспертной системы должен опираться на требования государственных и отраслевых стандартов по эмиссии электромагнитных помех и чувствительности к ним. По мере обучения экспертной системы накопление новых правил позволит использовать более гибкий набор требований по ЭМС к отдельным электронным блокам, что приведет к улучшению массогабаритных и функциональных характеристик электронной системы в целом. Результаты этого анализа головной исполнитель электронной системы (предприятие или головное подразделение на предпри-

ятии) может использовать для выдачи технических заданий соисполнителям по проекту (отдельным предприятиям-соисполнителям или подразделениям-соисполнителям в рамках одного предприятия).

Анализ «матриц электромагнитной совместимости» на уровне электронного блока предусматривает учет взаимодействий отдельных печатных плат, внутриблочного монтажа и корпусных деталей. Этот анализ обычно выполняется группой разработчиков на этапе рабочего проектирования. В основе анализа лежат как электрические параметры стандартных комплектующих (например, блок питания или индикаторный модуль), так и результаты предварительного моделирования характеристик разрабатываемых функциональных модулей (например, печатных плат).

Самым простым с точки зрения детерминированности является анализ «матриц электромагнитной совместимости» на уровне функциональных модулей (в том числе печатных плат). Основа анализа — электрические параметры элементов схемы из базы данных и уравнения классической теории поля. Экспертная система предусматривает возможность интеграции со стандартными программными пакетами моделирования электромагнитных взаимодействий на печатных платах путем импорта в систему выходных данных этих пакетов. Поэтому по желанию заказчика экспертная система может использовать эти данные в качестве источника для формирования новых правил своей базы знаний (для последующей автономной работы) или в качестве исходных данных для анализа на уровне электронного блока.

Эта система завершает линейку ООО «СЕРП» по направлению «Электромагнитная совместимость».

Выводы

Наиболее эффективным средством изоляции сигналов на печатной плате является пара поверхностей (питание-заземление или заземление-заземление), которые обеспечивают для полосковых линий ослабление взаимодействия сигналов как с внешней средой, так и между собой в пределах печатной платы. Большинство описанных приемов экранирования в большей или меньшей степени заменяют поверхность заземления при ее отсутствии в структуре платы. Исключением является экранирование с помощью переходных отверстий, которое может быть использовано совместно с полосковой линией для снижения перекрестных наводок и ослабления эмиссии помех с торцов платы. В связи с вышеизложенным, использование многослойных печатных плат, содержащих в своей структуре поверхности питания и заземления, является обязательным для обеспечения высоких параметров электромагнитной совместимости разрабатываемой аппаратуры. Для оптимизации технических решений эффективно применение специальных программных продуктов — экспертных систем.

Литература

1. Gonschorek K.-H., Vick R. Electromagnetic Compatibility for Device Design and System Integration. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2009.
2. Armstrong K. Design Techniques for EMC and signal integrity. Part 5: PCB design and layout. Cherry Clough Consultants, 5 March 2007.
3. Mardiguian M. Controlling Radiated Emissions by Design. Springer International Publishing, Switzerland, 2014.
4. Montrose M. I. Printed circuit board design techniques for EMC compliance. A Handbook for Designers. The Institute of Electrical and Electronics, 2000.
5. Chen H., Fang J. Effects of 20-H Rule and Shielding Vias on Electromagnetic Radiation From Printed Circuit Boards. IEEE 9th Topical Meeting on Electrical Performance of Electronic Packaging, 2000.
6. Rostamzadeh C. Experimental Investigation of PCB Guard Traces on Radiated EMI. IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, 2006.
7. Joffe E. B., Lock K.-S. Grounds for grounding. A Circuit-to-System Handbook. Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2010.
8. Bogatin E. Dramatic Noise Reduction using Guard Traces with Optimized Shorting Vias. Teledyne LeCroy Whitepaper, 2013.
9. Lindseth W. Effectiveness of PCB perimeter Via fencing: Radially propagating EMC emissions reduction technique. IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, 2016.
10. Suntives A., Khajooeizadeh A., Abhari R. Using Via Fences for Crosstalk Reduction in PCB Circuits. IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, 2006.
11. Simonovich B. Controlling Electromagnetic Emissions from PCB Edges in Backplanes. LAMSIM Enterprises Inc Whitepaper, 2017.
12. EMC Design Guide for Printed Circuit Boards. Ford Motor Company Engineering Specification # ES-3U5T-1B257-AA, 2002.